Uber glimmentlad... in luft und wasserstoff bei atmospharen...

Carl Stuchtey

Über

Glimmentladung in Luft und Wasserstoff bei Atmosphärendruck.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität zu Bonn

eingereicht und mit den beigefügten Thesen öffentlich verteidigt

am 29. Juli 1904, Mittags 12 Uhr

von

Carl Stuchtey

aus Rheda in Westfalen.

Opponenten:

Dr. phil. Walther Zurhellen,
cand. chem. Julius Rath,
cand. phil. Ernst Reuter.

Bonn,

Carl Georgi, Universitäts-Buchdruckerei und Verlag.

1904.

Dem Andenken

meiner lieben Eltern!

Von der Fülle der Beobachtungen, die auf dem Gebiete der Entladungen, speziell der Glimmentladungen vorliegen, ist die weitaus grösste Zahl in Geisslerschen Röhren bei sehr niedrigen Drucken angestellt worden. Nur vereinzelt finden sich in der Literatur Arbeiten über diese Entladungsform bei höheren Drucken. So hat Herr Homén[1]) das Druckintervall für Luft bis auf 290 mm Quecksilber erweitert. Herr Herz[2]) stellte später Untersuchungen in Stickstoff und Wasserstoff an bis zu Drucken von 7,99 resp. 8,37 mm. Von grossem Interesse ist aber zweifellos die Frage, ob die in Geisslerschen Röhren gefundenen Verhältnisse und Beziehungen auch noch für Entladungen bei atmospärischem Druck Giltigkeit haben. Einen Beitrag zur Lösung dieser Frage sollen die Untersuchungen geben, die ich auf Veranlassung von Herrn Professor Kaufmann über Glimmentladung bei Atmosphären-Druck anstellte. Die gefundenen Resultate zeigen völlige Übereinstimmung mit einigen orientierenden Messungen, die Herr Kaufmann[3]) in Luft früher ausgeführt, aber damals nicht publiziert hat. Inzwischen ist die Publikation erfolgt. Während der Ausführung meiner Beobachtungen erschien eine Arbeit von Herrn J. Stark[4]) über dasselbe Thema mit etwas anderer Versuchsanordnung als der meinigen. Herr

---

1) Wied. Ann. 26. 1885.
2) Wied. Ann. 54. 1895.
3) Physik. Zeitschr. 4. 578. 1903.
4) Physik. Zeitschr. 4. 535. 1903.

M. Töpler[1]) hat ebenfalls über Glimmentladung in Luft bei Atmosphärendruck Beobachtungen gemacht; jedoch sind seine Versuchsbedingungen ziemlich weit verschieden von den hier vorhandenen, namentlich beziehen sich seine Untersuchungen nur auf sehr kleine Stromstärken.

Für meine Arbeit bestand die Absicht, die Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Stromstärke für verschiedene Gase zu bestimmen; auch sollten die Beobachtungen auf Entladungen bei niedrigerem als Atmosphärendruck ausgedehnt werden, um eine Relation zwischen Potentialgefälle und Druck bei konstanter Stromstärke aufzusuchen. Infolge eines Defektes des Gleichstromtransformators, der zur Erzeugung hoher Spannung diente, mussten die Untersuchungen auf Luft und Wasserstoff bei Atsmosphärendruck beschränkt bleiben.

Versuchsanordnung.

Als Stromquelle diente ein Gleichstromtransformator, der eine Klemmenspannung von 2200 Volt lieferte. Bis zu einer Stromabnahme von 12 Milliampère konnte diese Spannung noch um diejenige einer aus 432 Elementen bestehenden Hochspannungsbatterie vermehrt werden. Mit Hinzufügung der städtischen Zentrale von ca. 220 Volt stand somit eine Spannung von etwa 3300 Volt zur Verfügung, die genügte, um selbst bei den kleinsten gebrauchten Stromstärken die Versuche bis auf hinlänglich grosse Elektroden-Entfernungen auszudehnen. Fig. 1 gibt eine Skizze der Versuchs-Anordnung. Wie diese zeigt, war die eine Seite der Stromquelle, und zwar stets die negative geerdet, um ungefährdet arbeiten zu können. Die Anordnung der Elektroden erläutert

1) Wied. Ann. 66. 1898.

die Fig. 2. Die ca. 2 mm dicke und spitze Anode A war — durch das Hartgummistück H von dem Gestell isoliert — fest montiert. Die ebene Kathode K, ein ca. 5 mm langer und 4 mm dicker Stift war eingeschraubt in einen Kupferblock C, der ausgehöhlt von Wasser durchflossen wurde. Letztere Vorsicht musste angewendet werden, um die Erwärmung der Kathode auf ein Minimum zu beschränken, da sonst die Entladung leicht unruhig wurde. Bei den kleineren Stromstärken genügte die Wärmeleitung des Kupferblocks allein, um Störungen in der Entladungsform zu vermeiden. Dieser Kupferblock C war an einem Schlitten S befestigt, so dass durch die Mikrometerschrauben M der Elektrodenabstand variiert werden konnte. Die Ganghöhe der Schraube betrug $^2/_3$ mm; und eine Einteilung des Kopfes D der Schraube in 100 Teile gestattete $^1/_{150}$ mm abzulesen. Zur Spannungsmessung diente ein Thomsonsches Quadrantelektrometer E (Fig. 1) mit bifilar aufgehängter Nadel, die, um den Messbereich genügend zu erweitern, durch ein aufgekittetes dünnes Bleistück beschwert war. Angewandt wurde teils die Nadelschaltung, bei welcher das eine Quadrantenpaar geerdet, das andere Quadrantenpaar und die Nadel auf das zu messende Potential gebracht wurden; teils die Schaltung mit Hilfsladung, wobei die Quadrantenpaare mit den Polen einer in der Mitte geerdeten kleinen Batterie verbunden und dadurch entgegengesetzt geladen waren, während nun die Nadel allein auf das zu messende Potential gebracht wurde. Als Hilfsladung dienten anfangs 72 Elemente der Hochspannungsbatterie; später, da deren Spannung sich wegen schlechter Isolation zu schnell änderte, eine Batterie aus 24 Trockenelementen. Bei der kleineren Hilfsladung durch die Trockenelemente

war, um hinlänglich grosse Elektrometerausschläge zu erhalten, eine Verminderung des Gewichtes der Nadel erforderlich. Selbstverständlich ist, dass bei der Hilfsladung mittels Akkumulatoren bei den einzelnen Messungsreihen Spannungsmessungen der Batterie vorgenommen wurden, um die Ausschläge auf eine bestimmte Spannung, bei welcher das Elektrometer empirisch geaicht war, zu reduzieren. Die Aichung der Skala geschah in folgender Weise: Zunächst wurden die Ausschläge des Elektrometers bis zu der Spannung von 860 Volt mit Hilfe der durch ein Siemenssches Präzisionsvoltmeter geaichten Hochspannungsbatterie festgelegt. Dann wurde von dem durch sehr grossen Widerstand geschlossenen Stromkreis des Transformators eine Abzweigung von der Mitte des Widerstandes zum Elektrometer gemacht, die Spannung durch das vorher geaichte Stück der Skala gemessen und durch Umschalten die Spannung der ganzen oder eines Teiles der Batterie hinzugefügt. Durch Variieren der Tourenzahl des Transformators sowohl als durch Variieren des Widerstandes im Stromkreis war es möglich, die abgezweigte Spannung beliebig zu ändern. Auf diese Weise gelang es, nach und nach die ganze Skala für den notwendigen Messbereich zu aichen. Die aus wiederholten Messungen gefundenen Aichungsresultate wurden graphisch aufgetragen, und die zwischenliegenden Punkte aus der so erhaltenen Kurve interpoliert. Für die erste Art der Schaltung hatte die gefundene Kurve die Gestalt einer Parabel, deren Gleichung lautete: $E = 25{,}4 \cdot \sqrt{n}$; für die zweite Art der Schaltung (Hilfsladeschaltung) war der Zusammenhang zwischen Spannung und Ausschlägen in Skalenteilen durch die Gleichung $E = 2{,}71 \, . \, n$ gegeben. Die Giltigkeit dieser Gleichungen erstreckte sich bis zu Aus-

schlägen von ca. 700 Skalenteilen; darüber hinaus war der Grad der Empfindlichkeit des Elektrometers geringer. Die Ablesung der Ausschläge war eine objektive. Zur Strommessung wurde bis zu Stromstärken von 14 Milliampère ein kleines Drehspulengalvanometer mit objektiver Spiegelablesung benutzt. Bei dem Skalenabstand von einem Meter ergab ein Milliampère einen Ausschlag von 24 Skalenteilen. Zur Messung grösserer Stromstärken trat an Stelle dieses Instruments ein Siemenssches Präzisionsvoltmeter, das bei 3000 Ohm innerem Widerstand $^1/_3$ Milliampère abzulesen und $^1/_{30}$ Milliampère zu schätzen gestattete. Zur Stromregulierung wurden die Hittorfschen[1]) Jodkadmium-Amylalkohol-Widerstände gebraucht, deren Form (Fig. 1a) aber etwas geändert war. Um nämlich die Verunreinigung der Elektroden durch den stets sich bildenden Schlamm zu vermeiden, war die untere Kadmiumelektrode als Ring mit eingeschmolzenem Platindraht geformt und etwa 10 cm von dem unteren Ende der Röhre angebracht. So konnten alle Verunreinigungen durch die Öffnung in dem Ring nach unten fallen; die Lösung sowohl als die Elektroden blieben während der ganzen Dauer der Versuche rein und brauchten nicht erneuert zu werden. Die obere Elektrode war beweglich; der Zuleitungsdraht aus Kupfer war von einer dünnen Glasröhre umgeben, so dass die Entfernung der Elektroden ungefährdet reguliert werden konnte. Von diesen Widerstandsröhren waren sechs von verschiedener Weite zu einem System W (Fig. 1) vereinigt, von dem nach Belieben die eine oder andere ausgeschaltet wurde. Für die engsten Röhren liessen sich keine Ringe mit genügend weiter

1) Wied. Ann. 7. 1879.

Öffnung mehr formen; sie erhielten daher die Gestalt wie sie Fig. 1b zeigt. Sie bestanden aus einer Kugel mit 2 Ansatzröhren, in denen sich die Kadmiumelektroden verschieben liessen. Da bei den grösseren Stromstärken sich die Flüssigkeit in den dünnen Röhren zu stark erwärmte, so wurde zu diesen Versuchen nur die weiteste Röhre von ca. 6 cm Durchmesser zur Regulierung verwandt, während Glühlampen von je 1000 Ohm Widerstand, zu je 10 vereinigt, als Ballastwiderstand dienten. Die Zuleitung von der Anode zum Elektrometer ging durch einen hohen Flüssigkeitswiderstand (Wasser) R (Fig. 1) hindurch, da sonst aus von Herrn Kaufmann[1]) angegebenen Gründen die Entladung bei den schwächsten Strömen wegen der hohen Kapazität des Elektrometers in einen Funkenstrom überspringt. Überhaupt war es bei den kleinen Strömen zur Erreichung einer ruhigen Glimmentladung notwendig, die Kapazität wenigstens einer Elektrode — gewählt wurde stets die Anode — möglichst zu verringern. So wurde bei Strömen von 3—6 Milliampère eine U-förmig gebogene Glasröhre mit Jodkadmiumlösung direkt vor die Anode gesetzt. Bei noch kleinerer Stromstärke musste die Kapazität der Anode noch mehr verringert werden. Es kam nun ein etwa $^1/_2$ mm dicker, nur 6 mm langer Kupferdraht als Anode in Anwendung, der seitlich in eine Hartgummiröhre (Fig. 2a), die als Widerstandsgefäss diente, eingeführt war. Ein Tropfen Kadmiumamalgam, in das der Kupferdraht eintauchte, vertrat hier die Stelle der einen Kadmiumelektrode in dem Gefäss. Zunächst zweigte die Zuleitung zu der Elektrometernadel noch von der Anode A ab. Bei den kleinsten Stromstärken jedoch wurde zur

---

1) Ann. d. Physik (4.) 2. 176. 1900.

weiteren Verringerung der Anodenkapazität das Elektrometer vor das Widerstandsgefäss gelegt. Hier musste dann der Potentialabfall im Widerstandsgefäss, wie er sich bei Kurzschluss der Entladungsstrecke ergab, von der jeweilig gemessenen Gesamtspannung abgezogen werden.

Art der Messung.

Gemessen wurde bei allen Versuchen die Elektrodenspannung als Funktion des Elektrodenabstandes bei konstanter Stromstärke. Die Messungen wurden so ausgeführt, dass zunächst die Elektroden zur metallischen Berührung gebracht wurden; dann wurde die Kathode mittelst der Mikrometerschraube langsam entfernt bis die Entladung eingeleitet war, was sich durch einen plötzlichen Ausschlag des bis dahin auf Null stehenden Elektrometers ankündigte. Dieser erste Ausschlag zeigte das Elektrodengefälle an. Etwaige Unsicherheiten in der Bestimmung des Nullpunktes sind in den unten stehenden Tabellen durch ein hinzugefügtes x zum Ausdruck gebracht. Der Betrag für x ist etwa gleich $^1/_{50}$ mm anzunehmen. Nun wurde die Elektrodenentfernung beliebig geändert, und die zu jedem Elektrodenabstand gehörigen Elektrometerausschläge abgelesen. Eine unruhige Entladung oder der Übergang der Glimmentladung in einen Funkenstrom machte sich durch ein starkes Schwanken der Elektrometer- und Ampèremeter-Nadel sofort bemerkbar. Ausserdem liess sich ein surrendes Geräusch vernehmen, welches zugleich mit einem veränderten Aussehen der Entladung jede Störung anzeigte.

Messungen in Luft.

Als Elektrodenmaterial diente zunächst Kupfer. Ein Reinigen der Kathode, welches häufig vorgenommen

wurde, änderte nichts an den Resultaten. Selbst Abschrecken d. h. schnelle Abkühlung der glühend gemachten Kathode in Alkohol, wodurch jede Oxydspur von dem Metall entfernt wurde, brachte keine Änderung hervor. Das Elektrodengefälle schwankte bei den Messungen von 1—60 Milliampère zwischen 282 und 302 Volt; es betrug im Mittel aus den unten angeführten Messungen 295 Volt. Bei den folgenden Tabellen bedeutet J die Stromstärke in Milliampère, d die Elektrodenentfernung in Trommelteilen, wobei 150 Trommelteile gleich 1 Millimeter sind, V gleich Volt die Elektrodenspannung. Für einige Stromstärken sind mehrere Messungen aufgeführt, um den Grad der Übereinstimmung zu konstatieren. Am Ende jeder Versuchsreihe ist das hieraus berechnete normale Potentialgefälle (s. weiter unten) dE/dL und seine Abweichung D in % gegen das nach einer auf Seite 19 aufgestellten Formel berechnete Gefälle angeführt.

Tabelle I.

J = 60		J = 55		J = 50	
d	V	d	V	d	V
0 + x	299	0 + x	299	0 + x	299
20	312	15	310	10	307
40	323	35	322	25	310
90	352	60	334	75	315
140	380	85	348	125	345
190	405	135	377	175	376
240	427	185	405	225	404
340	473	235	430	325	431
440	513	335	476	425	479
540	552	435	519	525	523
640	592	535	559	625	567
740	626	635	606	725	610
		735	646	825	653
		835	682	925	702
		935	722		740
		1035	772		
		1135	812		
dE/dL = 60		= 62		= 65	
D = +1,2 %		= +0,7 %		= +1,1 %	

J = 45		J = 40		J = 40	
d	V	d	V	d	V
0 + x	299	0 + x	296	0 + x	298
15	311	10	306	25	313
25	320	20	315	50	329
50	332	45	332	100	360
75	347	70	346	150	392
125	378	120	380	200	423
175	407	170	410	250	452
225	435	220	440	350	504
325	485	320	491	450	555
425	531	420	542	550	603
525	578	520	592	650	652
625	622	620	639	750	701
725	668	720	685	850	748
825	713	820	732	950	797
925	757	920	780		

dE/dL = 68 = 70 = 72
D = —0,7 % = —0,9 % = +1,9 %

J = 35		J = 30		J = 30	
d	V	d	V	d	V
0 + x	302	0 + x	299	0 + x	287
25	318	15	312	30	316
45	330	40	328	80	350
70	349	65	345	130	389
95	364	115	380	230	452
145	400	165	412	330	512
195	431	215	444	430	566
245	460	315	504	530	622
345	515	415	559	630	675
445	566	515	614	730	732
545	617	615	668	830	782
645	671	715	723	930	837
745	720	815	776		
845	772	915	829		
945	820	1015	878		
1045	872	1115	934		
1145	924	1215	984		
1245	973				

dE/dL = 76 = 80 = 80
D = +1,5 % = 0,0 % = 0,0 %

J = 25		J = 25		J = 20	
d	V	d	V	d	V
0 + x	287	0 + x	297	0 + x	293
25	319	13	310	25	317
75	346	38	329	75	355
125	387	63	347	125	400
225	460	113	385	175	438
325	523	163	421	225	476
425	585	213	457	325	547
525	643	313	520	425	613
625	700	413	581	525	676
725	755	513	637	625	738
825	811	613	695	725	800
925	870	713	753	825	860
1025	926	813	810	925	920
1125	985			1025	972
1225	1040			1125	1047

dE/dL = 86   = 86   = 93

D = —0,6 %   = —0,6 %   = —2,5 %

J = 15		J = 14		J = 14	
d	V	d	V	d	V
0 + x	284	0 + x	285	0 + x	288
25	316	20	311	10	291
75	360	70	357	20	308
125	410	120	406	30	320
175	453	170	452	80	367
225	497	220	495	130	415
325	577	320	576	180	462
425	654	420	654	230	504
525	725	520	729	330	585
625	791	620	797	430	660
725	861	720	870	530	730
825	931	820	936	630	804
925	1000	920	1010	730	872
1025	1067	1020	1180	830	945
1125	1138			930	1018
1225	1209				
1325	1277				

dE/dL = 104   = 107   = 107

D = —3,8 %   = —3,9 %   = —3,9 %

J = 12		J = 10		J = 10	
d	V	d	V	d	V
0 + x	300	0 + x	300	0 + x	292
18	314	10	312	15	323
42	336	30	330	85	387
92	389	60	364	105	411
142	437	100	408	155	461
192	485	150	458	205	510
292	570	200	505	255	577
392	656	300	597	355	651
492	740	400	689	455	740
592	820	500	773	555	823
692	898	600	863	655	905
792	980	700	945	755	989
892	1063	800	1028	855	1072
992	1143	900	1122	955	1156
1092	1219	1000	1208	1055	1240
1192	1309	1100	1293		

dE/dL = 121 = 130 = 126
D = +2 % = +1,1 % = —2,1 %

J = 9		J = 9		J = 7	
d	V	d	V	d	V
0 + x	301	0 + x	282	0 + x	300
15	320	65	372	10	314
30	333	95	402	25	331
50	357	145	460	50	362
100	412	195	510	100	426
200	514	245	560	150	482
300	608	345	656	200	540
400	702	445	748	300	646
500	793	545	835	400	753
600	880	645	925	500	849
700	973	745	1011	600	951
800	1068	845	1104	700	1054
900	1157			800	1152
				900	1250

dE/dL = 137 = 135 = 150
D = +1,8 % = +0,3 % = 0,0 %

J = 7		J = 6		J = 6	
d	V	d	V	d	V
0 + x	291	0 + x	293	0 + x	288
5	292	15	318	5	295
25	324	30	336	10	306
65	377	60	378	20	322
85	404	100	434	30	339
135	464	150	495	55	374
185	523	200	556	80	406
285	630	300	670	130	472
385	736	400	774	180	530
485	836	500	880	230	591
		600	988	280	646
		700	1094	330	707
		800	1205	380	760
		900	1310	430	812

dE/dL = 150   = 162   = 160
D = 0,0 %   = +1,0 %   = −0,3 %

J = 5		J = 5		J = 4	
d	V	d	V	d	V
0 + x	298	0 + x	288	0 + x	308
10	318	5	299	10	328
20	333	10	318	30	358
50	376	35	344	60	402
100	450	50	380	100	467
150	514	80	425	100	542
200	580	130	494	250	614
300	706	180	555	300	744
400	822	230	620	400	867
500	935	280	680	500	1011
600	1051	330	739	600	1139
700	1176	380	798	700	1270
800	1290				

dE/dL = 175   = 177   = 194
D = +0,9 %   = 2,0 %   = 1,5 %

J = 4		J = 2,75		J = 2	
d	V	d	V	d	V
0 + x	288	0 + x	300	0 + x	298
30	349	10	316	25	343
50	382	30	364	45	390
80	430	60	388	65	438
130	508	100	480	115	538
180	578	150	557	165	636
230	650	200	622	215	736
280	711	300	763	265	816
330	786	400	907	315	895
380	849	500	1060	365	979
		600	1211	415	1070
		700	1362	465	1149
		800	1508	565	1330
dE/dL = 189		= 252		= 259	
D = −1,1 %		= +0,2 %		= +0,5 %	

J = 2		J = 1		J = 0,75	
d	V	d	V	d	V
0 + x	294	0 + x	292	5	312
45	399	20	361	10	322
80	472	40	419	26	380
90	497	60	472	50	461
105	522	110	602	70	528
120	548	160	730	110	641
135	579	260	960	160	790
150	611	360	1187	210	926
170	644	460	1417	260	1058
190	681			310	1193
210	712			380	1378
230	746				
250	780				
dE/dL = 255		= 345		= 400	
D = −1,1 %		= −0,8 %		= +1,5 %	

In Fig. 3 und Fig. 4 sind diese Messungen graphisch dargestellt; und zwar bietet Fig. 3 ein Bild des ganzen Verlaufes der Kurven, Fig. 4 in grösserem Massstab ein solches des Anfangsverlaufs der Kurven bis zu einer Elektrodenentfernung von 2 mm. Wie man sieht, nimmt die Elektrodenspannung mit wachsender Entfernung anfangs steiler, dann weniger steil zu, bis

in grösserer Entfernung ein geradliniger Verlauf erreicht ist. Die Neigung dE/dL wird also schliesslich konstant, wie aus Fig. 5 noch deutlicher zu ersehen ist. Hier sind als Ordinaten die Gefälle dE/dL = V/mm aufgetragen, die aus der Spannungsdifferenz zweier benachbarter beobachteten Elektrodenentfernungen berechnet wurden; sie sind den Mittelwerten aus diesen Entfernungen zugeordnet. Aus den Fig. 3, 4, 5 ist ferner noch ersichtlich, dass mit zunehmender Stromstärke die Länge des konvexen Anstiegs zunimmt, und die Kurven um so früher einen gradlinigen Verlauf annehmen, je kleiner die Stromstärke ist. Worin der Grund für dieses Verhalten besteht, lässt sich schwer entscheiden. Wahrscheinlich ist die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Gasschicht und den Elektroden von Einfluss. Dieselbe wird grösser mit grösserer Stromstärke, und erst bei genügender Elektrodenentfernung werden die Verhältnisse in der Mitte konstant, so dass nunmehr die Zunahme der Elektrodenspannung mit der Elektrodenentfernung linear erfolgt. Berechnet man das Potentialgefälle in dem gradlinigen Teil der Kurven, welches für die betreffende Stromstärke als normal angesehen werden kann, so entsteht die Frage nach einem Zusammenhang zwischen Gefälle und Stromstärke. In Anlehnung an eine Untersuchung von Herrn Kaufmann [1]), ob das Gefälle irgend einer Potenz von J oder 1/J proportional zu setzen sei, wurden die Logarithmen von Gefälle und Stromstärke als Koordinaten aufgetragen (Fig. 6a). Die aufgetragenen Punkte liegen innerhalb der Fehlergrenzen auf einer Graden, deren Gleichung gleich $\log dE/dL + 0{,}43208 \cdot \log J = 2{,}54137$ zu setzen ist.

---

1) l. c.

Die Konstanten dieser Formel sind nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Der Zusammenhang zwischen Gefälle und Stromstärke findet seinen Ausdruck in der Form $dE/dL \cdot \sqrt[2.32]{J} = 347{,}8$. Innerhalb welcher Fehlergrenzen diese Beziehung als richtig anzusehen ist, zeigt folgende Tabelle, in der die beobachteten und die nach obiger Formel berechneten Werte für das normale Gefälle in V/mm aufgeführt sind. Zur besseren Übersicht sind noch die Abweichungen der berechneten von den beobachteten Werten in Prozenten = D hinzugefügt, deren wechselnde Vorzeichen dartun, dass keine bestimmte Richtung der Abweichung bevorzugt ist.

Tabelle II.

J	dE/dL berechnet	dE/dL beobachtet	Abweichung in % = D
0,75	393,3	400	—1,5
1	347,8	345	+0,8
2	257,8	259	—0,5
2,75	224,7	225	—0,2
4	191,1	194	—1,5
5	173,5	175	—0,9
6	160,4	162	—1,1
7	150,1	150	+0,0
9	134,6	137	—1,8
10	128,6	130	—1,1
12	118,6	121	—2,0
14	111,2	107	+3,9
15	108,0	104	+3,8
20	95,3	93	+2,5
25	80,0	86	+0,6
30	86,6	80	+0,0
35	74,9	76	—1,5
40	70,7	70	+0.9
45	68,5	68	+0,7
50	64,2	65	—1,1
55	61,6	62	—0,7
60	59,3	60	—1,2

In Fig. 6 b ist die nach der Gleichung $dE/dL \cdot \sqrt[2.32]{J} = 347{,}8$ berechnete Kurve dargestellt, und in dieselbe

sind die beobachteten Werte eingezeichnet. Eine Diskussion über die gefundene Relation folgt auf Seite 35[1]).

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen sollte die Frage beantwortet werden, ob das Potentialgefälle von dem Elektrodenmaterial abhängig wäre. Hier stellte sich aber die Schwierigkeit in den Weg, dass es bei den meisten Metallen, wie Eisen, Cadmium, Blei nicht möglich war, ruhige Entladungen zu erhalten; die Entladung schwankte hin und her in dem Bestreben, die Kante der genau wie früher geformten Kathode aufzusuchen. Der Grund für dieses Ver-

---

1) Anmerkung. Die von Herrn Kaufmann (l. c.) gefundene Beziehung zwischen Potentialgefälle und Stromstärke ist aufgestellt für sehr kleine Elektrodenentfernungen; die Konstanten seiner Gleichung sind daher andere. Berechnet man aber aus einigen der dort aufgeführten Kurven, wie etwa für die Stromstärken $J = 21$ und $= 10{,}1$ Milliampère, bei denen der gradlinige Verlauf der Kurven als erreicht angesehen werden kann, die Gefälle, so finden sich Werte, die der von mir aufgestellten Beziehung genügen. Der empirischen Formel $dE/dL \cdot \sqrt[2.32]{J} = 347{,}8$ genügen ebenfalls die von Herrn M. Töpler (Wied. Ann. 66. 1898) für sogenannte Büschellichtbogen bei kleinen Stromstärken und Schlagweiten bis zu 1 cm gefundenen Werte. Aus seiner Tabelle VII (S. 674) berechnen sich die Potentialgefälle bei einer Stromstärke von 1,5 Milliampère zu

Schlagweite in cm	0,1		0,2		0,3		0,4
Potentialdifferenz	630		910		1220		1510
Potentialgefälle V/mm		280		310		290	
Mittel				293			

Nach obiger Formel ergibt sich das Gefälle zu 291,9 V/mm. Aus seiner Tabelle VI (pg. 672) findet man bei 1,5 – 1,6 Milliampère zwischen 1 und 2 cm Elektrodenentfernung das Gefälle zu 318 V/mm. In beiden Fällen ist also innerhalb der Fehlergrenzen Übereinstimmung vorhanden.

halten konnte nicht ermittelt werden. Nur bei Zinkelektroden gelang es gute Messungen zu erhalten, obwohl auch hier die Entladung erst ruhig und messbar wurde bei einer Elektrodenentfernung von 1/5 mm. Das Elektrodengefälle zu bestimmen, war somit unmöglich, jedoch lässt es sich durch Extrapolation zu etwa 285 Volt finden. Die folgende Tabelle zeigt die Werte für die beobachteten Stromstärken; Fig. 7 gibt ihre graphische Darstellung.

Tabelle III.

J = 5		J = 10	
d	V	d	V
30	318	30	303
50	342	50	328
70	373	70	347
90	402	120	379
120	444	170	441
170	515	270	536
220	580	370	626
270	654	470	720
370	770	570	800
470	881	670	885
570	1000	770	978
670	1118	870	1062
770	1234	970	1151
870	1367	1070	1240
970	1482	1170	1320
1070	1598	1270	1420

Das Potentialgefälle berechnet sich an der Hand der Kurven für J = 5 Milliampère zu 181 V/mm, für J = 10 Milliampère zu 132 V/mm. In beiden Fällen erscheint dasselbe gegenüber den Messungen mit Kupferelektroden höher und zwar um etwa 3 %. Diese Abweichungen liegen noch an der Grenze der Beobachtungsfehler, so dass sich weitere Schlüsse über etwaige Abhängigkeit des Gefälles von dem Elektrodenmaterial nicht ziehen lassen.

Untersuchungen in Wasserstoff.

Um Versuche in Wasserstoff anzustellen, war es nötig, den Apparat etwas abzuändern (Fig. 8). Zunächst wurde die Funkenstrecke aufrecht gestellt, womit die Entladung nun in vertikaler Richtung und zwar von unten nach oben vor sich ging. Dass die Senkrechtstellung allein an den Resultaten nichts änderte, zeigen einige Messungen in Luft, die mit den vorher angegebenen genügend übereinstimmen.

Tabelle IV.

J = 30		J = 40	
d	V	d	V
0 + x	293	0 + x	293
30	320	30	317
55	336	55	332
105	373	105	363
155	407	155	393
205	442	205	426
305	500	305	476
405	554	405	527
505	607	505	576
605	663	605	625
805	768	705	671
905	818	805	717
1005	869	905	767
1105	920	1005	811
1205	975		
1305	1023		
1405	1076		

Gefälle.

J	Elektroden horizontal	Elektroden vertikal	Abweichung in $^0/_0$
30	80	78	−2,5
40	70,7	70,5	−0,3

Ferner wurde bei der neuen Versuchsanordnung die Anode A von einem Hartgummigefäss E umgeben, welches mit Quecksilber gefüllt war. Dieses hatte

den Zweck, die mit dem Kupferblock C festverbundene Glasröhre G abzuschliessen. Somit war eine Möglichkeit geschaffen, die Entladung in beliebige Gasen übergehen zu lassen und zugleich die Elektrodenentfernung variieren zu können. Durch das Röhrchen R strömte der Wasserstoff in das Gefäss ein und konnte durch das Ansatzstück D austreten. Letzteres tauchte etwa 2 mm tief in ein mit Schwefelsäure gefülltes Näpfchen, durch welche Massregel die Röhre G völlig von der Luft abgeschlossen war. Durch ein Fensterchen F aus dünnem Glas konnte die Entladung beobachtet und photographiert werden. Es erwies sich als notwendig, den Wasserstoff langsam durchströmen zu lassen, da sich sonst durch die verschiedene Erwärmung des Gases Unregelmässigkeiten einstellten und das Gefälle erniedrigt wurde. Inwieweit der Einfluss der Erwärmung sich geltend machte, mögen folgende Messungen zeigen, bei denen die Glasröhre mit Luft gefüllt war.

Tabelle V.

J = 10		J = 14	
d	V	d	V
0 + x	282	0 + x	297
10	287	20	324
30	327	70	367
80	369	120	412
130	423	170	452
180	470	220	491
230	518	320	565
330	604	420	642
430	687	520	707
530	771	620	767
630	851	720	830
730	927	820	895
830	1007	920	962
930	1086	1020	1027
		1120	1090
		1220	1156

Wie sich aus dem Vergleich der beobachteten Gefälle mit den aus der empirischen Gleichung auf pg. 19 berechneten in freier Luft ergibt, sind die Abweichungen sehr bedeutend und zwar um so grösser, je grösser die Stromstärke, da ja hier die Erwärmung der eingeschlossenen Luft eine viel höhere ist.

Gefälle.

J	ohne Glasröhre	mit Glasröhre	Abweichung in %
10	128,6	118	— 9
14	111,2	97	—15

In strömendem Gase sind solche Fehler ausgeschlossen, was auch durch einige Messungen bewiesen werden möge.

Tabelle VI.

J = 10		J = 12	
d	V	d	V
0 + x	290	0 + x	290
25	321	25	321
50	350	50	353
100	407	100	402
150	457	150	448
200	504	200	495
250	551	250	539
300	597	300	580
		350	624

Diese Messungen in strömender Luft erstrecken sich zwar nur über geringe Elektrodenentfernungen, so dass das normale Potentialgefälle nicht berechnet werden kann (sie wurden später nur mit der Batterie angestellt), ihr Anfangsverlauf sowie das Gefälle zwischen d = 200—300 zeigen aber gute Übereinstimmung mit den früheren Messungen.

Der benutzte Wasserstoff wurde im Kippschen Apparat erzeugt und in einem Gasometer aufgefangen. Nach Durchgang durch eine Reihe von Waschflaschen trat der gereinigte und getrocknete Wasserstoff in die Glasröhre G ein. Eudiometrische Untersuchungen auf Reinheit des Gases ergaben keine nachweisbaren Verunreinigungen.

Bei den meisten Stromstärken wurden verschiedene Messungen ausgeführt, die zwar nicht völlige aber doch hinreichende Übereinstimmung ergaben. Jeder Versuchsreihe ist das aus ihr berechnete normale Gefälle am Schluss hinzugefügt, ebenso die Abweichung desselben in Prozent gleich D von dem Gefälle, wie es sich aus den Mittelwerten der jeweiligen Beobachtungen berechnet, die ebenfalls in der Tabelle aufgeführt sind. Graphisch aufgetragen in Fig. 9 sind die Mittelwerte. Zur Aufstellung der später mitgeteilten Relation sind ebenfalls diese Werte herangezogen.

Tabelle VII.

J = 60					
				Mittel	
d	V	d	V	d	V
0 + x	291	0 + x	288	0 + x	290
20	317	15	317	30	318
45	330	60	358	60	347
95	369	95	395	90	372
145	405	145	436	120	395
245	479	195	463	150	418
345	552	295	542	180	441
545	698	395	622	240	487
745	832	495	692	300	531
945	966	595	765	450	644
				600	755

dE/dL = 100 = 108 = 104
D = −3,8 % = +3,8 %

J = 50					
				Mittel	
d	V	d	V	d	V
0 + x	291	0 + x	287	0 + x	289
10	307	10	295	30	316
30	322	15	306	60	343
50	341	35	318	90	371
100	387	135	406	120	399
150	431	235	487	180	444
200	477	335	567	240	499
300	561	435	648	300	549
400	641	535	727	360	597
500	722	635	801	450	671
600	794	735	882	510	717
700	866	835	958	600	785
800	938	935	1032	750	897
900	1015	1035	1110	900	1009
1000	1092			1035	1112
1100	1187				

dE/dL = 112 = 114 = 113
D = −0,9 % = +0,9 %

J = 45		J = 30	
d	V	V	V
0 + x	288	0 + x	278
15	308	5	287
40	330	10	300
65	353	20	313
90	377	40	337
140	422	140	455
190	470	240	560
240	512	340	657
340	596	440	753
440	682	540	842
540	760	640	931
640	835	740	1019
740	912		
840	987		
940	1065		
1040	1147		

dE/dL = 116 = 135

J = 40					
d	V	d	V	d	V
0 + x	282	0 + x	286	0 + x	284
20	303	20	294	30	317
60	347	25	300	60	347
100	383	45	330	90	377
150	436	90	382	120	405
200	479	145	430	150	435
300	570	245	533	210	395
400	659	345	622	300	574
500	747	445	707	360	627
600	825	545	787	450	706
700	907	645	861	600	828
800	984	745	939	720	923
900	1071	845	1020	810	997
		945	1102	930	1093
		1045	1186		

dE/dL = 122 = 120 = 121
D = +0,8 % = −0,8 %

J = 35					
				Mittel	
d	V	d	V	d	V
0 + x	290	0 + x	290	0 + x	290
10	302	15	305	30	322
20	311	40	336	60	356
45	337	65	363	90	386
70	366	115	412	120	416
95	391	215	507	150	446
120	416	315	600	210	504
170	468	415	692	300	590
220	518	515	779	360	646
320	616	615	868	450	727
420	706	715	952	600	859
520	795	815	1034	750	986
620	882			900	1112
720	969			1050	1239
820	1042				
920	1135				
1020	1218				

dE/dL = 126 = 128 = 127
D = −0,8 % = +0,8 %

J = 25					
				Mittel	
d	V	d	V	d	V
0 + x	284	0 + x	278	0 + x	281
5	290	15	300	30	319
15	309	40	327	60	353
40	336	65	354	90	385
90	396	115	412	120	421
190	506	165	465	150	456
290	615	265	572	240	552
390	717	365	671	300	614
490	813	465	766	450	762
590	907	565	861	600	905
690	1004	665	956	750	1050
		765	1048	900	1192
		865	1142	1050	1336
		965	1237		
		1065	1340		
dE/dL = 144		= 143		= 144	
D = +0,0 %		= −0,7 %			

J = 20					
d	V	d	V	d	V
0 + x	287	0 + x	289	0 + x	284
40	317	20	311	5	300
65	348	40	342	30	330
90	388	70	370	55	357
115	419	95	401	80	384
140	450	120	436	105	412
190	511	170	502	155	478
240	572	220	561	205	532
290	637	320	671	305	643
340	693	420	778	450	755
440	798	520	896	505	861
540	902	620	1002		
640	1004	720	1109		
740	1103	820	1216		
840	1207	920	1313		
dE/dL = 154		= 159		= 164	
D = −3,9 %		= −0,6 %		= +2,5 %	

J = 20			
		Mittel	
d	V	d	V
0 + x	275	0 + x	284
10	283	30	316
20	297	60	353
40	319	90	392
65	335	120	428
90	384	150	465
140	445	210	536
190	507	300	641
240	563	360	708
340	676	390	741
440	787	450	806
540	898	570	935
640	1007	630	998
740	1111	720	1095
840	1218	810	1190

dE/dL = 159 = 160
D = −0,6 %

J = 15					
d	V	d	V	d	V
0 + x	289	0 + x	282	0 + x	288
10	306	10	284	10	297
20	313	20	308	20	317
45	343	40	339	30	332
70	376	70	371	50	362
95	407	120	438	150	490
120	438	170	502	250	613
170	506	270	627	350	742
220	617	370	752	450	858
320	698	470	868	550	977
420	812	570	982	650	1093
520	931	670	1091	750	1213
620	1051	770	1207		
720	1172	870	1327		

dE/dL = 179 = 173 = 177
D = +0,6 % = −2,9 % = −0,6 %

J = 15			
d	V	d	V
0 + x	286	0 + x	268
25	322	30	327
50	361	60	365
75	384	90	405
100	413	120	443
150	478	150	482
200	540	210	559
250	602	300	668
300	662	360	742
350	727	420	815
450	838	450	849
550	969	510	919
650	1086	600	1025
750	1210	660	1097
850	1332	690	1133
		720	1169

dE/dL = 182 = 178
D = +2,2 %

J = 10					
				Mittel	
d	V	d	V	d	V
0 + x	273	0 + x	282	0 + x	278
10	282	10	292	30	321
20	303	60	369	45	343
45	337	110	442	70	380
70	377	210	587	120	454
120	452	310	738	170	528
170	526	410	880	210	586
270	676	510	1016	270	677
370	822	610	1151	310	736
470	963	710	1287	370	823
570	1100			410	879
670	1237			470	962
				510	1017
				570	1097
				610	1153
				670	1235

dE/dL = 208 = 204 = 206
D = +1,0 % = −1,0 %

J = 5		J = 3		J = 4	
d	V	d	V	d	V
0 + x	284	0 + x	283	0 + x	284
5	296	10	287	5	324
15	312	25	312	25	337
25	334	45	346	45	381
50	377	70	396	70	439
75	417	95	442	95	491
100	462	145	539	120	543
125	510	195	637	145	602
175	596	245	736	195	711
225	685	295	833	245	812
275	774	345	932	295	918
325	862	395	1019	345	1020
425	1042			395	1137
dE/dL = 267		= 287		= 327	

J = 2,25		J = 1,85		J = 1,6	
d	V	d	V	d	V
0 + x	283	0 + x	283	0 + x	283
5	288	15	305	10	317
15	313	25	330	25	360
25	337	45	396	50	427
50	407	70	467	75	492
70	470	95	534	100	557
100	528	120	603	125	625
125	593	145	667	150	696
150	654	170	732	175	767
175	711	205	834	200	835
200	770				
225	833				
250	893				
275	953				
dE/dL = 364		= 387		= 418	

J = 1,5	
d	V
0 + x	283
10	300
20	328
25	349
50	429
75	494
125	637
150	722
175	793
200	863
dE/dL = 423	

Bei den kleinsten Stromstärken musste auch hier die Kapazität der Anode möglichst verringert werden, was durch die Einführung eines Widerstandsgefässes in die Glasröhre, durch das Hartgummigefäss hindurch, gelang (Fig. 8a). Das Elektrodengefälle schwankt zwischen 273 und 291 Volt und berechnet sich im Mittel aus allen Messungen zu 285 Volt. Die Gestalt der in Fig. 9 graphisch dargestellten Kurven zeigt einen ähnlichen Verlauf wie bei den Messungen in Luft. Auch hier liegt am Anfang ein steilerer Anstieg, bis die Elektrodenspannung allmählich proportional der Entfernungsänderung zunimmt; es ist dieser konvexe Anstieg daher wohl ebenso zu erklären wie in Luft. Es wird jedoch in Wasserstoff wegen der schnelleren Abkühlung infolge der geringeren Reibung und der dadurch verursachten rascheren Zirkulation des Gases der gradlinige Teil der Kurven früher erreicht als in Luft. Dieses Verhalten ist ersichtlich sowohl aus Fig. 9, als auch aus Fig. 10, die die Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Elektrodenentfernung darstellt. Eine gewisse Willkür in der Zeichnung der Kurven ist zwar vorhanden, jedoch dürfen dieselben wohl ein einigermassen zutreffendes Bild der Verhältnisse geben. Der Vergleich der Kurven in Fig. 5 und 10 zeigt, dass in Luft der gradlinige Teil der Kurven für 60 Milliampère bei etwa 3 mm Elektrodenentfernung erreicht ist, während in Wasserstoff dieses Verhalten schon in einer Entfernung von etwa 2 mm vorhanden ist. Noch deutlicher zeigt sich dieser Unterschied bei den kleineren Stromstärken.

Auch für Wasserstoff gelang es, eine Relation zwischen dem normalen Gefälle und der Stromstärke aufzustellen. Sie wurde in derselben Weise wie früher aufgesucht und die Konstanten wieder nach der Methode

der kleinsten Quadrate berechnet. Die logarithmischen Werte von dE/dL und J genügen der Gleichung der Geraden: log dE/dL + 0,38281 log J = 2,69734, wie sie in Fig. 6a dargestellt ist. Die Werte dE/dL und J befriedigen die Form

$$dE/dL \cdot \sqrt[2,61]{J} = 499,4.$$

In Fig. 6b findet diese Gleichung ihre graphische Darstellung. Die beobachteten Werte sind in die berechnete Kurve eingetragen. Aus der folgenden Tabelle lässt sich ersehen, innerhalb welcher Fehlergrenzen die berechneten Werte der normalen Gefälle mit den beobachteten übereinstimmen.

Tabelle VIII.

J	dE/dL berechnet	dE/dL beobachtet	Abweichung in % = D
1,5	426,5	423	+0,9
1,6	416,1	418	—0,5
1,85	393,7	387	+1,7
2,25	365,2	364	+0,3
3	327,1	327	+0,0
4	293,0	287	+2,1
5	269,0	267	+0,8
10	206,3	206	+0,2
15	176,7	178	—0,8
20	158,2	160	—1,1
25	145,3	144	+0,9
30	135,5	135	+0,4
35	127,7	127	+0,6
40	121,4	121	+0,3
45	116,0	116	—0,0
50	111,4	113	—1,4
60	103,9	104	- 0,1

Das Potentialgefälle nimmt, wie namentlich die logarithmischen Kurven (Fig. 6a) zeigen, mit abnehmender Stromstärke relativ langsamer zu in Wasserstoff als in Luft. Falls Extrapolation nach kleineren als den beobachteten Stromstärken hin gestattet ist, müssen sich die beiden Kurven für Luft und Wasserstoff

schneiden; und jenseits des Schnittpunktes müsste das Gefälle für eine bestimmte Stromstärke in Wasserstoff kleiner sein als in Luft. Somit würden dann die Verhältnisse eintreten, wie sie in verdünnten Gasen tatsächlich und zwar auch bei grösseren Stromstärken vorhanden sind. Für dieses besondere Verhalten in verdünnten Gasen werden wohl thermische Einwirkungen von Bedeutung sein. Der Punkt, der sich durch Rechnung aus den beiden obigen Gleichungen als Schnittpunkt der Kurven ergibt, liegt bei $0{,}68 \cdot 10^{-3}$ Milliampère. Das für Luft und Wasserstoff bei dieser Stromstärke gleiche normale Gefälle betrüge 8115 V/mm, wenn die Extrapolation zulässig ist. Diesen Punkt experimentell aufzusuchen, war nicht möglich, da die berechneten Grössen ausserhalb des Messbereichs der Instrumente liegen; auch hätte sich die Entladungsform längst geändert. Man kann nun die Annahme machen, dass der für Atmosphärendruck bei sehr kleinen Stromstärken liegende Schnittpunkt sich mit abnehmendem Druck den grösseren Stromstärken nähert, bis schliesslich die ganze Kurve für das Gefälle des Wasserstoffs unterhalb derjenigen für Luft liegt, womit dann die Verhältnisse eintreten, wie man sie in Geisslerschen Röhren bei sehr niedrigem Druck gefunden hat. Um diese Annahme auf ihre Richtigkeit hin zu prüfen, sollten Untersuchungen bei niedrigen Drucken ausgeführt werden; aus dem früher angegebenem Grunde mussten dieselben aber unterbleiben.

Nach den empirischen Gleichungen für Luft:

$$dE/dL \cdot \sqrt[2.31]{J} = 347{,}8,$$

für Wasserstoff:

$$dE/dL \cdot \sqrt[2.61]{J} = 499{,}4.$$

erscheint der Einfluss der Stromstärke auf das Potentialgefälle als ein sehr grosser, während Beobachtungen mit verdünnten Gasen nur eine sehr geringe Abhängigkeit ergeben haben. Eine kleine Rechnung macht es jedoch wahrscheinlich, dass bei dieser Abhängigkeit nicht die Stromstärke resp. Stromdichte, sondern die mit zunehmender Stromstärke zunehmende Verdünnung des Gases infolge der Erwärmung die Hauptrolle spielt. Angenommen es sei

$$dE/dL = \rho^n \cdot j^m \cdot A,$$

wo ρ die Gasdichte, j die Stromdichte, A eine Konstante bedeutet. ρ ist nach dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz porportional $^1/_T$, wo T die absolute Temperatur ist. Die durch den Strom der Längeneinheit des Gases pro Sekunde zugeführte Wärmemenge ist $= dE/dL \cdot j$. Nimmt man T proportional $dE/dL \cdot j$ an, so ergibt sich die Gleichung

$$dE/dL \doteq \frac{1}{(dE/dL)^n \cdot j^n} \cdot j^m \cdot A$$

oder

$$(dE/dL)^{n+1} = j^{m-n} A$$

oder

$$dE/dL = j^{\frac{m-n}{n+1}} \cdot A.$$

Für Luft ist beobachtet

$$\frac{m-n}{n+1} = -\frac{1}{2,32}, \quad \text{oder } m = n - \frac{1+n}{2,32}$$

Aus den Beobachtungen von Herrn Homén[1]) folgt, wie Herr M. Töpler[2]) gefunden hat, dass der Wert für m zwischen 1 und 0,5, wahrscheinlich näher an 0,5 liegt. Je nachdem welchen der Werte man für n einsetzt, ergibt sich

$$\text{für } n = 0,5 \quad m = -0,15$$
$$\text{für } n = 1 \quad m = +0,14$$

1) Wied. Ann. 38. 1889.
2) l. c.

Wir erhalten demnach für m vermutlich einen sehr kleinen negativen Wert. Für Wasserstoff ist der für

$$\frac{m-n}{1+n} \text{ gefundene Wert} = -\frac{1}{2{,}61}$$

Nehmen wir auch hier den Betrag für n als zwischen 0,5 und 1 liegend an, so folgt aus

$$m = n - \frac{1+n}{2{,}61}$$

für $n = 0{,}5$ $\qquad m = -0{,}075$

„ $n = 1$ $\qquad m = +0{,}23$.

Der Wert von m ist jedenfalls sehr klein und vermutlich negativ. Die vorstehende Betrachtung zeigt also folgendes: Das Gefälle nimmt mit zunehmender Stromdichte bei konstanter Gasdichte nur sehr wenig ab in Übereinstimmung mit den Beobachtungen in verdünnten Gasen. Die bei Atmosphärendruck gefundene starke Abhängigkeit ist daher im wesentlichen durch die Verdünnung des Gases infolge von Erwärmung bedingt.

Über die Art der Entladung.

Die Entladungsform war die allgemein bekannte, bestehend aus dem negativen Glimmlicht, das einen mit der Stromstärke wachsenden Teil der Kathodenfläche bedeckt, dem Faradayschen Dunkelraum und der positiven Lichtsäule. Geschichtete Entladung wurde in Luft nur bei Stromstärken von etwa 2 bis 5 Milliampère beobachtet; und zwar erschien immer nur eine dunkele Unterbrechung der positiven Lichtsäule, deren Abstand von der Kathode konstant blieb. Herr M. Töpler[1]) erhielt bei seinen Untersuchungen in atmosphärischer Luft mit Spannungen von 80000 Volt

1) Wied. Ann. 63. 1897.

Fig. 11.
J = 20
d = 475

Fig. 12.
J = 20
d = 275

Fig. 13.
J = 20
d = 375

Fig. 14.
J = 20
d = 625

Fig. 15.
J = 30
d = 300

Fig. 16.
J = 30
d = 450

Fig. 17.
J = 30
d = 600

Fig. 18.
J = 40
d = 325

Fig. 19.
J = 40
d = 525

mehrere Schichten; hierbei ist jedoch zu bemerken, dass bei seinen Versuchen mit grösseren Abständen gearbeitet wurde. In Wasserstoff zeigen sich bei allen Stromstärken von 8—60 Milliampère geschichtete Entladungen. Ob bei Stromstärken unter 8 Milliampère die Entladung auch in geschichteter Form vor sich geht, kann nicht angegeben werden, da bei der ersten Beobachtung der Schichten, die wegen ihrer Feinheit mir zuerst entgingen, die Untersuchungen für die kleineren Stromstärken schon abgeschlossen waren. Wegen des inzwischen eingetretenen Defektes der Maschine konnten dieselben nicht wieder aufgenommen werden. Auf den Verlauf des Potentialgefälles haben die Schichten keinen Einfluss; ein solcher ist trotz der sorgfältigsten Messungen nicht zu entdecken gewesen. Es wäre daher falsch, aus dem zickzackförmigen Verlauf der Kurven in Fig. 10 auf eine derartigen Abhängigkeit, wie sie Herr Wood[1]) in verdünnten Gasen beobachtet hat, zu schliessen, zumal auch die Abstände der Schichten nicht mit den Ausbuchtungen der Kurven zusammenfallen. Fig. 11—19 zeigen Photographien geschichteter Entladungen in 4,2 facher Vergrösserung; in Fig. 20 ist ein negatives Bild der Fig. 15 in 36-facher Vergrösserung der natürlichen Verhältnisse gezeichnet. Die hellen Teile der Figur 20 entsprechen den dunklen Schichten, die dunkel schraffierten Teile den hellen Schichten; die schwach schraffierte Fläche gibt die ungefähre Ausdehnung der Aureole wieder. Die Schichten sind konvex nach der Kathode zu. Über eine Elektrodenentfernung von 2 mm hinaus werden die der Anode zunächst liegenden Schichten undeutlich und verschwinden bei noch grösserer Ent-

1) Wied. Ann. 59. 1896.

Tabelle IX.

d	Länge des Kathodenlichts in mm	Länge des Faraday-Dunkelraums in mm	Länge in mm der 1. hellen Schicht	1. dunklen Schicht	2. hellen Schicht	2. dunklen Schicht	3. hellen Schicht	3. dunklen Schicht	4. hellen Schicht	4. dunklen Schicht	5. hellen Schicht	5. dunklen Schicht
J = 20 M.-A.												
275	0.181	0.405	0.132	0.094	0.118	0.076	0.106	0.069	0.099	0.070	0.079	
375	0.298	0.378	0.184	0.088	0.139	0.090	0.113	0.091	0.108	0.056	0.089	
475	0.226	0.382	0.212	0.127	0.161	0.099	0.160	0.088				
625	0.270	0.226	0.146	0.175	0.146	0.190	0.101	0.140				
J = 30 M.-A.												
300	0.251	0.516	0.123	0.113	0.116	0.067	0.095	0.062	0.076	0.073	0.078	0.053
450	0.262	0.647	0.200	0.114	0.123	0.094						
600	0.342	0.647	0.241	0.172	0.158							
J = 40 M.-A.												
325	0.218	0.726	0.120	0.136	0.095	0.086	0.068	0.079	0.076	0.079		
525	0.300	0.724	0.300 ?	0.175 ?								

fernung; jedoch ist bei den grössten erreichten Abständen immer noch eine Schicht, wenn auch undeutlich zu erkennen.

In der nebenstehenden Tabelle IX sind die Längen in mm (in Richtung der Strombahn) des Kathodenlichtes, des Faradayschen Dunkelraums, der hellen und dunklen Schichten angegeben. Die Schichten sind gezählt von der Kathode zur Anode hin. Die mitgeteilten Grössen wurden durch Projektion der photographischen Platten in etwa neunfacher Vergrösserung auf Millimeterpapier gefunden. Mit Sicherheit lassen sich aus diesen Zahlen keine Beziehungen zwischen Anzahl der Schichten, Länge der Schichten, Elektrodenentfernung und Stromstärke aufstellen; jedoch haben folgende allgemeine Bemerkungen an der Hand der Messungen einen hohen Grad der Wahrscheinlichkeit:

1. Bei konstanter Stromstärke nimmt die Länge des negativen Glimmlichtes mit der Elektrodenentfernung bis zu einem Grenzwerte zu.

2. Der Faradaysche Dunkelraum nimmt bei konstanter Stromstärke mit der Elektrodenentfernung bis zu einem Grenzwerte zu.

3. Sowohl die Länge der hellen als der dunklen Schichten nimmt bei konstanter Stromstärke mit der Elektrodenentfernung zu.

4. Bei jeder Entladung, unabhängig von Stromstärke und Elektrodenentfernung nimmt der Querschnitt der ganzen Entladungsbahn mit der grösseren Entfernung von der Kathode ab.

5. Jede dunkele Schicht hat in ihrer ganzen Breitenausdehnung gleiche Länge, während die hellen Schichten nach dem Rande der Entladungsbahn zu schmäler werden.

Aus den für die Durchmesser des Kathodenlichtes gefundenen Werten und der Stromstärke wurde die Stromdichte j an der Kathode für die einzelnen Stromstärken und Elektrodenentfernungen berechnet. In der folgenden Tabelle bedeutet 2r den Durchmesser des Kathodenlichts.

Tabelle X.

J	d	2r = mm	j = M-A/mm²
20	275	0,731	
20	375	0,761	43,17
20	475	0,767	
20	625	0,811	
30	300	0,925	
30	450	0,967	40,93
30	600	1,008	
40	325	1,100	41,63
40	425	1,112	
			Mittel 41,91

Es ergaben sich für die Stromdichte an der Kathode nahezu gleiche Grössen, die auf eine Konstanz schliessen lassen. Der Mittelwert für die Stromdichte beträgt 41,91 M.-A./mm². Die gefundene Konstanz der Stromdichte stimmt mit den Verhältnissen, wie sie in Geisslerschen Röhren bei konstantem Druck herrschen, überein. Von Herrn Hehl[1]) wurde für die Abhängigkeit der Stromdichte an einer Draht-Kathode von dem Druck in Wasserstoff die Formel aufgestellt:

$$\frac{i}{l \cdot 2 \cdot \pi \cdot r} = c \cdot p^2$$

(i = Stromstärke, l = Länge des negativen Glimmlichts, r = Radius des Kathodendrahts). Diese Relation hat für das von Herrn Hehl untersuchte Druckintervall von 0,76—2,7 mm bei Aluminiumelektroden volle Giltig-

1) Dissertation Erlangen 1901.

keit; extrapoliert man jedoch auf Atmosphärendruck, so ergibt sich als Stromdichte 797 M.-A./mm², ein Wert, der sehr weit von dem beobachteten abweicht. Dass das Elektrodenmaterial von Einfluss auf die Stromdichte an der Kathode wäre, ist nicht anzunehmen; denn einer von Herrn Wilson[1]) aufgestellten Beziehung zwischen Stromdichte und Druck für Luft genügen sowohl die für Platin- als für Aluminiumelektroden gefundenen Werte.

Berechnet man aber aus einigen von Herrn Warburg[2]) angegebenen Beobachtungsresultaten für Entladungen zwischen Aluminiumelektroden in Wasserstoff (l. c. p. 23) — die Stromdichte an der Kathode, wie sie Tabelle XI aufweist, so lässt sich aus dem Werte der Stromdichte für p=3,05 mm und dem von mir gefundenen Werte für p=760 mm eine Gleichung

$$j = p^{1,58} \cdot 0,00122$$

konstruieren, die auch von dem dazwischen liegenden Werte für p=5,06 mm erfüllt wird. Ob die Abweichungen für kleinere Drucke ein Zeichen für die Ungiltigkeit der obigen Gleichung in diesem Intervall sind, oder ob dieselben auf Unsicherheiten in der Druckbestimmung zurückzuführen sind, möge dahingestellt sein.

Tabelle XI.

p	j berechnet	j beobachtet	Abweichung in %
760	41,95	41,91	+0,0
5,06	0,01565	0,01584	— 1,2
3,05	0,00705	0,00705	+ 0,0
2,83	0,00627	0,00488	+28,4
1,92	0,00340	0,00173	+96,6

1) Philos. Magazine IV. 1902.
2) Wied. Ann. 45. 1892.

Zum Schluss wurden noch die Längen (in Richtung der Strombahn gemessen) der hellen und dunkeln Schichten unabhängig von Elektrodenentfernung und Stromstärke als Funktion der zugehörigen mittleren Stromdichte j, wie sie sich durch Bestimmung des Querdurchmessers ermitteln liess, graphisch aufgetragen. In der folgenden Tabelle bezeichnet l die Länge der Schichten in mm.

Tabelle XII.

J = 20. d = 275 = 11/6 mm.		
	j = M-A/mm^2	l = mm
1. helle Schicht	53,7	0,132
1. dunkle „	58,3	0,094
2. helle „	61,3	0,118
2. dunkle „	64,1	0,076
3. helle „	70,7	0,106
3. dunkle „	76,0	0,069
4. helle „	78.2	0,099
4. dunkle „	82,3	0,070

J = 20. d = 375 = 15/6 mm.		
	j = M-A/mm^2	l = mm
1. helle Schicht	41,5	0,184
1. dunkle „	45,0	0,088
2. helle „	48,6	0,139
2. dunkle „	51,6	0,090
3. helle „	58,0	0,113
3. dunkle „	63,8	0,091

J = 20. d = 475 = 19/6 mm.		
	j = M-A/mm^2	l = mm
1. helle Schicht	36,5	0,212
1. dunkle „	38,1	0,127
2. helle „	40,2	0,161
2. dunkle „	42,2	0,099
3. helle „	44,0	0,166
3. dunkle „	46,6	0,088

J = 20. d = 625 = 25/6 mm.		
	j = M-A/mm²	l = mm
1. helle Schicht	34,3	0,226
1. dunkle "	36,8	0,146
2. helle "	39,6	0,175
2. dunkle "	42,2	0,146
3. helle "	43,2	0,190
3. dunkle "	46,5	0,101
4. helle "	49,0	0,140

J = 30. d = 300 = 2 mm.		
	j = M-A/mm²	l = mm
1. helle Schicht	62,0	0,123
1. dunkle "	67,5	0,113
2. helle "	73,0	0,116
2. dunkle "	78,7	0,067
3. helle "	85,6	0,095
3. dunkle "	89,6	0,065
4. helle "	94,8	0,076
4. dunkle "	103,2	0,073

J = 30. d = 450 = 3 mm.		
	j = M-A/mm²	l = mm
1. helle Schicht	39,3	0,200
1. dunkle "	41,9	0,114
2. helle "	46,0	0,123
2· dunkle "	49,1	0,094

J = 30. d = 600 = 4 mm.		
	j = M-A/mm²	l = mm
1. helle Schicht	38,2	0,241
1. dunkle "	40,5	0,172
2. helle "	43,1	0,158

J = 40. d = 325 = 13/6 mm.		
	j = M-A/mm²	l = mm
1. helle Schicht	68,6	0,120
1. dunkle „	76,9	0,136
2. helle „	84.8	0,095
2. dunkle „	92,8	0,086
3. helle „	96,4	0,068
3. dunkle „	103,2	0,079
4. helle „	109,6	0,076
4. dunkle „	114,0	0,079

Nach Fig. 21 scheinen die Werte sowohl für die hellen wie für die dunklen Schichten mit genügender Annäherung auf je einer hyperbolischen Kurve zu liegen. Nur die Werte für die dunklen Schichten bei J = 40, d = 325 zeigen eine grössere Abweichung von dieser Kurve. Für die Konstruktion einer empirischen Formel, welche die Länge der Schichten als Funktion der Stromdichte darstellt, genügte das vorliegende Beobachtungsmaterial nicht.

Die vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Universität Bonn ausgeführt. Dem Direktor desselben, Herrn Prof. Dr. H. Kayser, bin ich für das mir stets gezeigte Wohlwollen zu grösstem Dank verpflichtet. Besonders gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. W. Kaufmann, der nach Anregung zu dieser Arbeit mich stets in liebenswürdigster Weise mit Rat und Tat unterstützt hat. Auch ist es mir ein Bedürfnis, an dieser Stelle den Herren Privatdozenten Dr. A. Bucherer und Dr. A. Pflüger für ihr freundliches Entgegenkommen herzlichsten Dank zu sagen.

Lebenslauf.

Geboren bin ich, Carl Stuchtey, am 22. Oktober 1880 zu Rheda in Westfalen als Sohn des jetzt verstorbenen fürstlichen Schloss- und Mühlenverwalters Heinrich Stuchtey und seiner jetzt ebenfalls verstorbenen Gattin Amalie, geb. Dieckmann.

Nachdem ich von 1887—1891 die Elementarschule und von 1891—1895 die Mittelschule meiner Vaterstadt besucht hatte, bezog ich das Real-Gymnasium in Bielefeld, welches ich Ostern 1899 mit dem Zeugnis der Reife verliess. Darauf widmete ich mich an den Universitäten Bonn (Ostern 1899 bis Herbst 1900), Berlin (Herbst 1900 bis Ostern 1901), Göttingen (Ostern 1901 bis Ostern 1902), Bonn (Ostern 1902 bis Ostern 1904) dem Studium der Mathematik und Physik. Die Doktorprüfung bestand ich am 11. Mai 1904.

Vorlesungen hörte ich bei folgenden Herren Professoren und Dozenten:

in Bonn: Anschütz, Bender, Erdmann, Hagenbach, Heffter, Kaufmann, Kayser, Kortum, Lipschitz, A. Pflüger, Rauff, Rein;

in Berlin: Aeschkinass, v. Bezold, Frobenius, Lasson, Münch, Neesen, Pringsheim, E. Schmidt, Schwarz, Vierkandt;

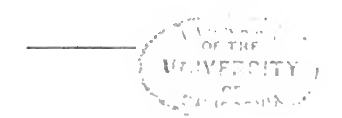
in Göttingen: Ambronn, Baumann, Hilbert, Klein, Müller, Riecke, Sommer, Stark, Voigt, Wagner, Wiechert.

Ihnen allen bin ich zu Dank verpflichtet.

Thesen.

---

1. Starke Funkenentladungen und Lichtbogen sind prinzipiell nicht verschieden.
2. Die für Glimmentladung bei Atmosphärendruck gefundene starke Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Stromstärke ist im wesentlichen durch die mit zunehmender Stromstärke zunehmende Erwärmung des Gases bedingt.
3. Die Methode, die Länge des Meters auf Wellenlängen zu beziehen, bedarf der Vervollkommnung.
4. Es ist dringend erforderlich, in dem Geschichtsunterricht an höheren Lehranstalten den Gang der Verfassungsgeschichte, die wirtschaftlichen Grundlagen des Staates und die Entwicklung der Stände mehr zu berücksichtigen.
5. Die Entstehung der Eiszeiten lässt sich aus den Folgen der Tätigkeit der durch das Versinken des gegenwärtigen Bodens des grossen Ozeans hervorgerufenen Vulkane erklären.



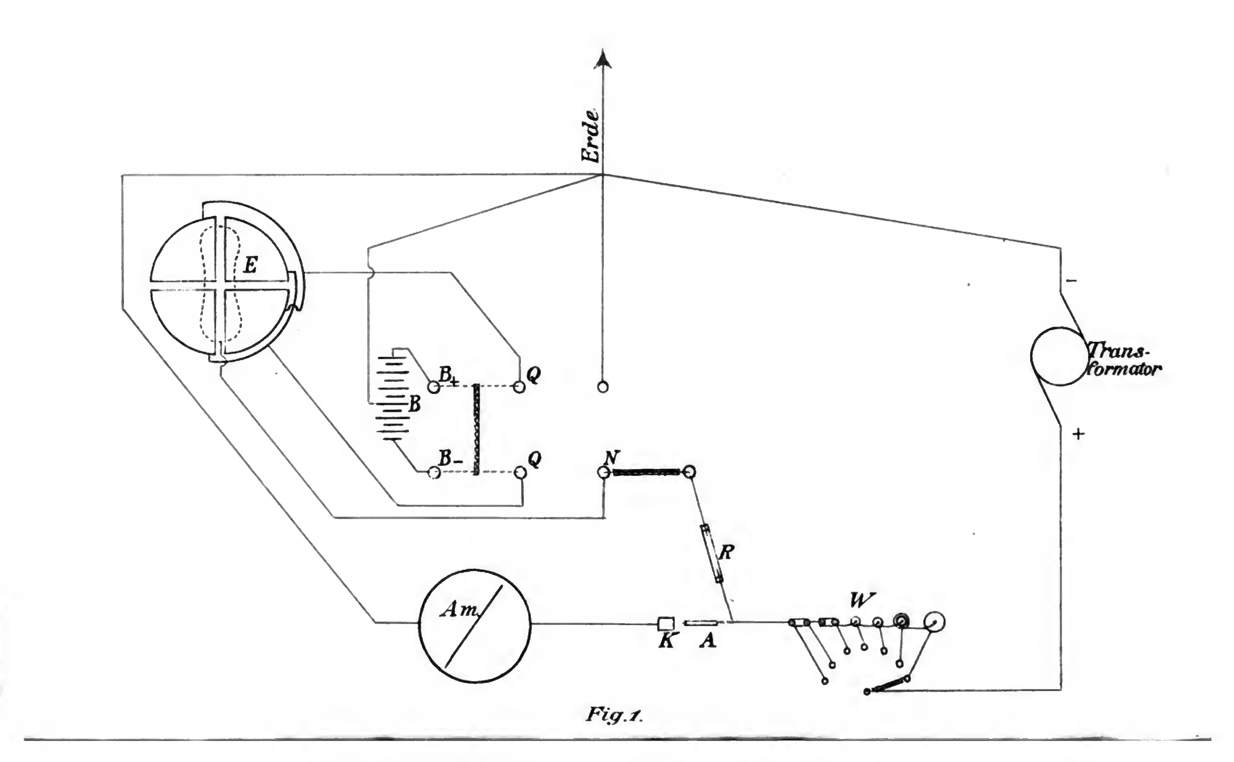


Fig. 1.

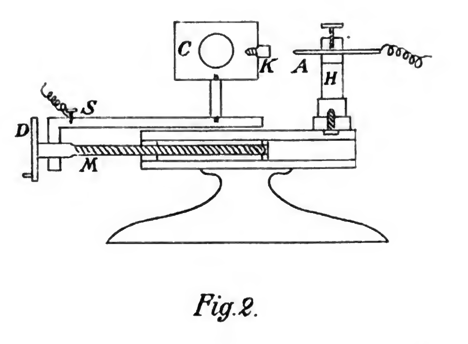


Fig. 2.

Fig. 1a

Fig. 1b

K

A

Fig. 2a

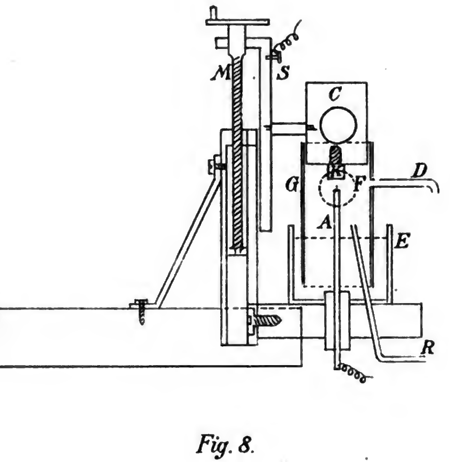
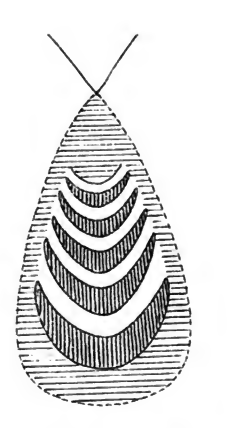
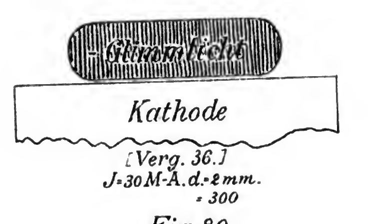


Fig. 8.

Fig. 8a





[Verg. 36.]
J=30 M-A. d.=2mm.
=300

Fig. 20.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF

Stuchtey
140232
QC711
S8